多源降水产品在高寒内陆河流域的适用性和误差组分

徐柳昕[1,2]，　王文雨[1,2]，　王晓燕[1,2]，　王雪莹[1,2]，　谷黄河[1,2]

（1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室，江苏 南京　210098；
2. 河海大学水文水资源学院，江苏 南京　210098）

摘　要：降水资料的质量是高寒山区径流模拟精度的重要影响因素，对水资源管理及生态安全等至关重要。本文结合多种统计指标和误差分解模型，对比分析4套降水产品（卫星降水数据GPM、亚洲地区高质量高时空分辨率降水数据集AIMERG、再分析数据CMFD和ERA5）在叶尔羌河上游流域的降水时空分布特征，评估不同产品的精度，解析不同产品的误差特征。结果表明：（1）CMFD和AIMERG的年降水呈现了南高北低的空间特征，与基于中国地面台站的插值格点数据集CN05.1的特征一致，但ERA5和GPM呈现了相反的空间分布。高分辨率的AIMERG和CMFD可以捕捉到西南部冰川区降水高的特征。（2）不同降水产品的年际变化特征差异显著且多数产品夏秋季节降水占比超过60%。对比发现，仅有AIMERG产品可以较好地呈现研究区降水年内变化的峰型和峰现时间，对站点月降水量的捕捉能力最强，呈现较高的相关系数（>0.6）和较小的均方根误差（8.45~11.57 mm），而ERA5产品最差。（3）日尺度的不同降水产品精度均呈现出多雨期（5—10月）高于少雨期（11月—次年4月）的特征，AIMERG在不同时期均呈现较高的日降水关键成功指数。（4）不同降水产品夏季的主导误差均为命中误差，而冬季的主导误差随降水产品而变化。研究成果可为高寒区径流模拟和降水产品的算法改进提供一定的参考价值。

关键词：再分析数据；卫星降水；AIMERG；误差分解模型；叶尔羌河上游

降水是水循环的重要环节[1-2]，其时空分布对水资源及生态环境具有显著影响[3]。然而在我国西北高寒山区，由于受气候、地形影响和观测手段的限制等，气象观测站点稀少且空间分布不均[4]，难以描述区域降水的时空特征，因此，找到适用于我国西北高寒地区的高质量降水资料是研究区域气候变化的基本保障，对促进水资源管理和生态环境保护等领域的研究具有重要意义。

卫星遥感和再分析系统是获取大范围、高时空分辨率降水信息的主要途径[5]。目前已有许多学者在西北、青藏高原区域进行了不同类型降水产品的适用性分析[6-8]。Tang[9]等指出在我国适用性较好的卫星降水产品是GPM IMERGE和GSMaP，ERA5数据的精度优于其他再分析降水数据。Sun[6]等进一步分析了ERA5在亚洲高山地区的适用性，发现ERA5显著高估了观测降水量。汪梓彤等[7]指出GPM IMERG在青藏高原反演降水精度优于GSMaP。相似地，金晓龙等[8]发现新一代卫星降水产品GPM在天山地区的准确性总体高于TRMM和CMORPH，但GPM在高海拔地区仍存在较大的估算误差，可见目前的主流卫星降水产品GPM在高海拔山区的应用潜力仍有待提高。为此，亚洲地区高质量高时空分辨率降水数据集AIMERG于2020年发布，其是由GPM IMERG数据和高质量地面观测产品APHRODITE融合而成，已被初步证实在东北地区、东南湿润地区及天山地区等的精度优于GPM数据[10]，但AIMERG和其他降水产品在流域尺度尤其是高海拔内陆河流域的适用性差异尚缺乏系统的

收稿日期：2024-09-24；　**修订日期：**2024-12-01
基金项目：中央高校基本科研业务费（B240201075）；国家自然科学基金项目（42277074）；水利部重大科技项目“智慧化流域产汇流及洪水预报模型研究”（SKR-2022074）
作者简介：徐柳昕（2001-），女，硕士研究生，主要从事水文与水资源研究. E-mail: 231601010127@hhu.edu.cn
通讯作者：王晓燕. E-mail: xywang@hhu.edu.cn

探讨。

降水产品的精度评估有利于识别不同产品的总体误差，而不同误差成分的分析对降水产品算法的改进和误差订正具有重要的理论指导意义[11]。目前降水产品误差解析的研究集中在个别卫星降水产品如GPM[12]、GSMaP[11]等数据集上，而较少研究针对多源降水产品进行综合性的误差解析。因此，本研究选择典型内陆河叶尔羌河上游为研究区，对比分析多源降水产品的时空特征差异，评估不同产品的准确性，采用误差分解模型识别不同降水产品的误差来源。研究成果可为高寒区径流模拟提供数据参考，也可为降水产品的算法改进提供一定的参考价值。

1 数据与方法

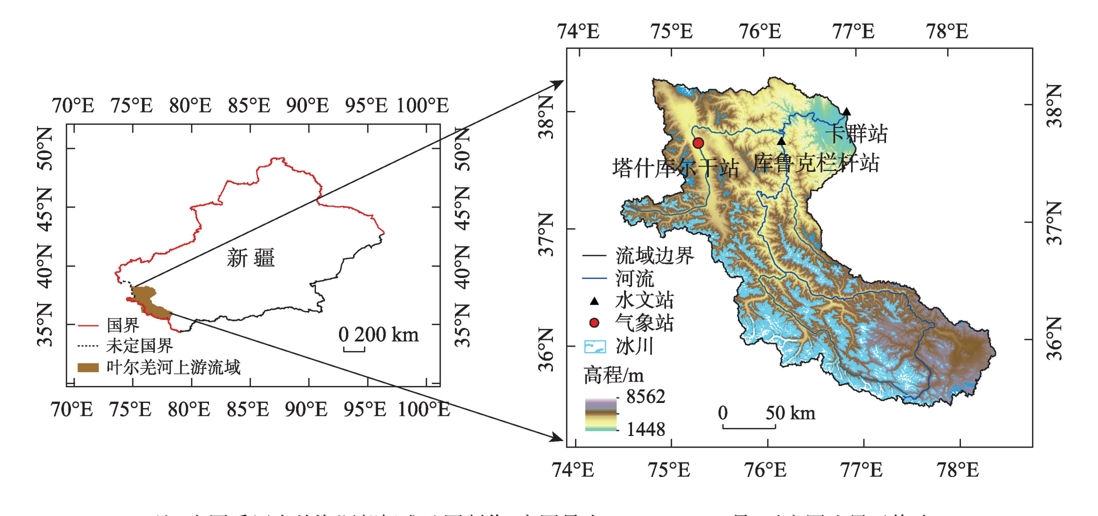
1.1 研究区概况

叶尔羌河是塔里木河的源流之一，发源于喀喇昆仑山口北坡，地处塔里木盆地西南缘，流域内有排名中国第四、新疆第一位的叶尔羌河灌区[13]。本研究选用叶尔羌河上游（卡群水文站以上区域）作为研究区（图1），面积约50248 km^2，布设有塔什库尔干气象站、库鲁克栏杆水文站和卡群水文站。流域地形复杂，呈南高北低趋势。海拔高差较大，最大为8562 m，在出口处海拔降低到1448 m。研究区内降水和气温要素分布极不均匀，冰川发育丰富，面积约5852 km^2，约占流域面积的12%[14]。流域径流年际变化大，径流主要补给来源为冰雪融水和山区降水。

1.2 数据来源

1.2.1 地面观测数据　站点日降水资料（2001—2010年）来源于国家气象站（塔什库尔干站）和两个水文站（卡群站和库鲁克栏杆站），用于降水产品在点尺度的精度评估及误差组分特征研究。CN05.1数据是基于中国境内2400多个国家级台站的逐日观测数据插值而成[15]，在卫星降水、气候模拟降水等评估中广泛使用[16-17]。该数据空间分辨率为0.25°，时间步长为日，来自中国气象数据共享网。由于研究区内气象站点稀少，CN05.1数据可能存在不确定性。为了进一步验证CN05.1数据在叶尔羌河上游的可靠性，结合Kan等[18]研究中的9个实验站点的降水观测数据评估了CN05.1的精度，发现CN05.1与站点（降水资料时间系列长度不低于3 a）多年平均降水的相对误差在-3%~-6%。CN05.1月降水的变化与观测值有较好的一致性，多数站点的月降水相关系数高于0.7，其中有4个站点的月降水相关系数高于0.75。以上结果从一定程度上说明了CN05.1在研究区年平均降水、月降水变化方面的可靠性。此外，由于Kan等[18]研究中多数实验站点的降水资料系列较短（2014—2015年），而CN05.1数据具有较长的时间系列（2001—2015年），因此本文选择CN05.1数据为地面参考数据集，从年平均降水误差及月降水相关系数两个方面进行不同降水产品的空间精度评估。

1.2.2 GPM数据　GPM（Global Precipitation Measurement）是由美国宇航局（NASA）和日本宇宙航天



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2024)0650号，对底图边界无修改。

图1 叶尔羌河上游流域概况图

Fig. 1 The map of the headwater catchment of upper Yarkant River

机构(JAXA)联合实施的全球降水观测计划[19]。新一代GPM IMERG是由GPM计划推出，由于星载微波、红外、降雨雷达等传感器的融合，使得IMERG实现了多种数据源的优势互补[20]。本研究采用的GPM IMERG V06的空间分辨率为0.1°×0.1°，时间步长为日，使用的研究时段为2001—2015年。

1.2.3 *ERA5数据*　ERA5是欧洲中期天气预报中心(ECWMF)继ERA-Interim后推出的第五代再分析产品，综合运用了先进模式和资料同化系统，具有高时空分辨率、快速更新和多参数等优势[20-22]。本文中使用2001—2015年的ERA5数据的空间分辨率为0.25°×0.25°，时间分辨率为1 h。

1.2.4 *CMFD数据*　中国区域地面气象要素数据集(China Meteorological Forcing Dataset，CMFD)是以Princeton再分析资料、GLDAS资料，以及TRMM降水资料为背景场，由中国气象站点降水数据融合而成的一套再分析数据集[23]，该数据集中降水数据时间分辨率为3 h，空间分辨率为0.1°×0.1°[24]。

1.2.5 *AIMERG数据*　AIMERG是基于GPM数据和APHRODITE融合而成的亚洲地区高质量高时空分辨率降水数据集，来源于国家青藏高原科学数据中心，时间步长为30 min，本文采用的2001—2015年的空间分辨率为0.1°×0.1°的降水产品来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/1090dead-dbba-44c8-980c-ca4c631d3d5c/)。

1.3 研究方法

1.3.1 *数据评价指标*　本研究中采用了相关系数(CC)、均方根误差(RMSE)和相对误差(BIAS)、误报率(FAR)、命中率(POD)及关键成功指数(CSI)6个指标评估不同降水产品的有效性。

$$\mathrm{FAR}=\frac{F}{H+F} \tag{1}$$

$$\mathrm{POD}=\frac{H}{H+M} \tag{2}$$

$$\mathrm{CSI}=\frac{H}{H+M+F} \tag{3}$$

式中：H为卫星产品和地面站点都能够探测到的降水事件数(次)；F为卫星产品探测到，但是地面站点未探测到的降水事件数(次)；M为地面站点探测到，卫星产品未探测到的降水事件数(次)。

1.3.2 *误差分解模型*　降水产品的误差组分可以通过误差分解模型[25]来进行评估。该模型将降水事件分为命中降水事件、漏报降水事件和误报降水事件(表1)。由于这3种类型的降水事件相互独立，则降水产品的总误差(T)分解为3种误差组分：命中误差(H)、漏报误差(M)和误报误差(F)。

表1　不同类型降水事件发生情况联列表

Tab. 1　The definition for different types of precipitation events

	降水产品≥阈值	降水产品≤阈值
地面降水≥阈值	命中事件(H)	漏报事件(M)
地面降水≤阈值	误报事件(F)	未降雨事件(N)

$$T=P-P_{ref} \tag{4}$$

$$H=P^{H}-P_{ref}^{H} \tag{5}$$

$$-M=-P_{ref}^{M} \tag{6}$$

$$F=P^{F} \tag{7}$$

$$T=H-M+F \tag{8}$$

式中：P_{ref}和P分别表示观测数据和降水产品的总降水量(mm)；P_{ref}^{H}、P_{ref}^{M}表示命中事件和漏报事件对应的观测总降水量(mm)；P^{H}、P^{F}分别表示命中和误报事件对应的降水产品总降水量(mm)。本研究中的阈值取值为0.10 mm。

2 结果与分析

2.1 降水产品的时空分布特征

研究显示[18]，山区降水有较强的季节性变化，叶尔羌河上游5—10月总降水占年降水的65%以上，因此，将研究区的年降水区分为多雨期降水(5—10月)和少雨期降水(11月—次年4月)。根据不同降水产品在研究区的空间分布可以看出(图2)，CN05.1、CMFD和AIMERG的年降水呈现了南高北低的空间特征，而ERA5和GPM呈现了相反的空间分布。多数产品的多雨期降水分布特征与年降水一致，但少雨期降水特征在不同产品间差异较大。此外，不同降水产品对流域降水空间异质性的描述存在差异。CN05.1和ERA5空间分辨率较低，均未能反映冰川区降水量较高的情形。GPM虽具有较高的空间分辨率，但流域降水空间分布差异不显著，大部分区域的年降水低于150 mm。与其他产品相比，AIMERG和CMFD均呈现较高的降水空间差异，而且AIMERG和CMFD均可以捕捉到西南部

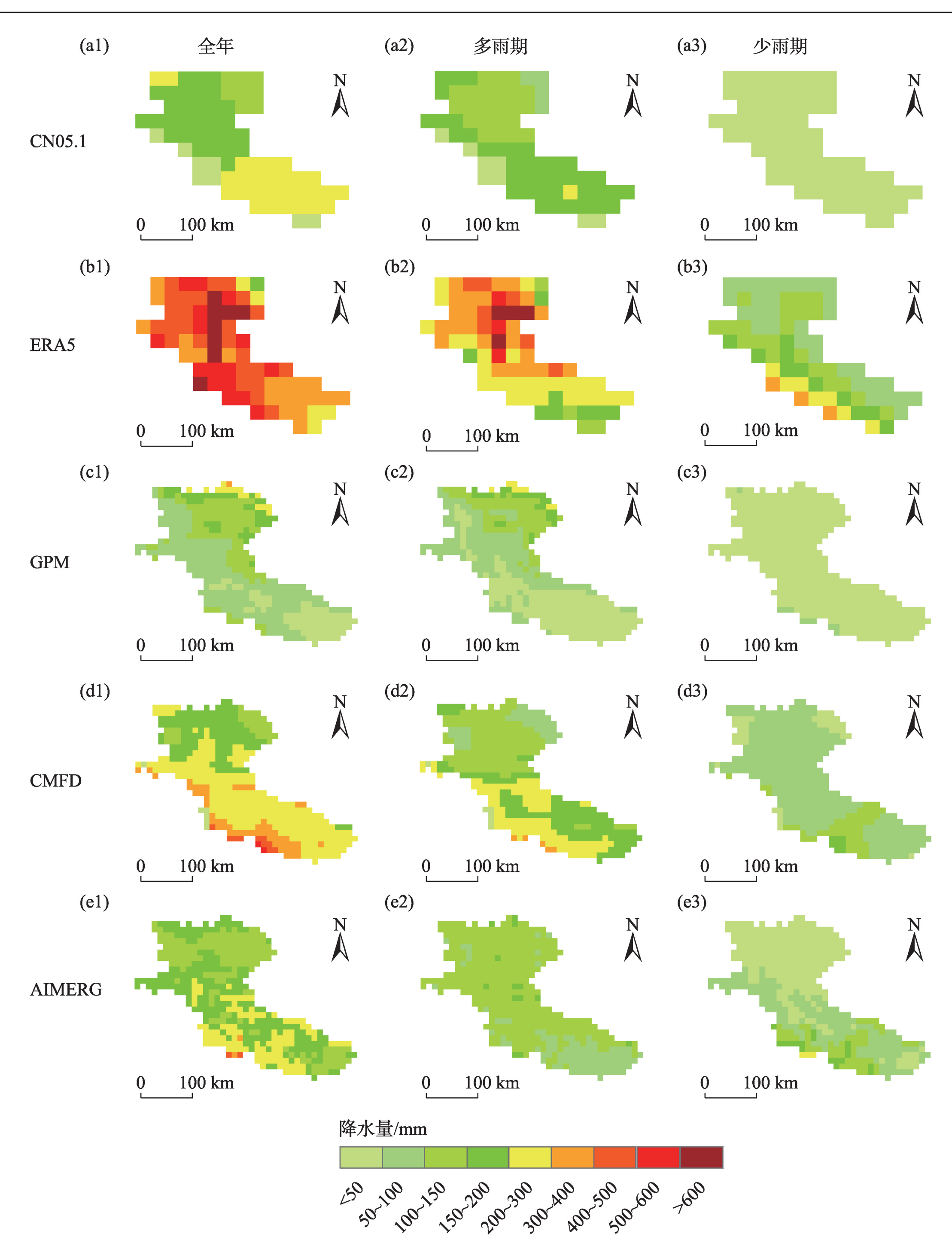


图2 不同降水产品的年平均、季节平均降水量空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of mean annual and seasonal precipitation for different precipitation products

冰川区降水高的特征。

根据5种降水产品2001—2015年年降水量时间序列(图3a)发现,5种降水产品在叶尔羌河上游的年均降水量差异显著。年均降水量最高的产品为ERA5(456.02 mm),最低的产品为卫星降水数据GPM(89.37 mm),CN05.1和AIMERG的年降水量较为接近(190.40 mm,174.00 mm)。ERA5降水产品的年际变化比较平稳;CN05.1、GPM及AIMERG的年降水呈现了先增加后减少趋势,而CMFD的年降水呈现先减少后增加的趋势。由不同降水产品季节降水分布图(图3b)发现,多数降水产品夏秋季节降水占比高于60%,不同产品的夏季降水量差异显著,其中ERA5的夏季平均降水量达到CN05.1的2.2倍,而GPM夏季降水仅为CN05.1的三分之一。

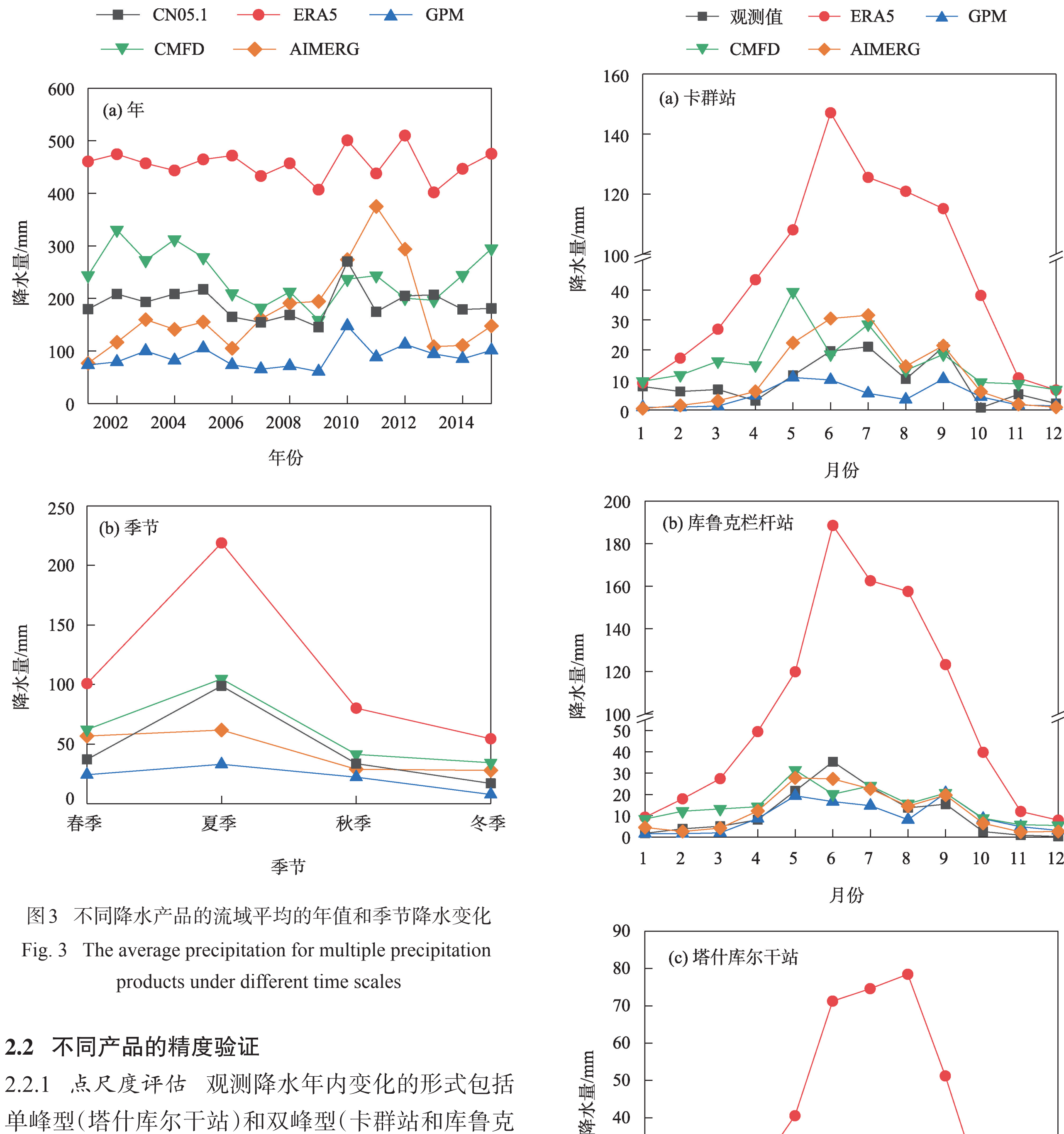


图3 不同降水产品的流域平均的年值和季节降水变化

Fig. 3 The average precipitation for multiple precipitation products under different time scales

图4 2001—2010年4种降水产品和观测降水年内变化

Fig. 4 The seasonal pattern of four precipitation products and observed precipitation from 2001 to 2010

2.2 不同产品的精度验证

2.2.1 点尺度评估 观测降水年内变化的形式包括单峰型(塔什库尔干站)和双峰型(卡群站和库鲁克栏杆站)，前者的峰现时间在6月，后者为6—7月和9月(图4)。对比不同产品发现，仅有AIMERG可以较好地再现研究区年内降水的峰型和峰现时间。CMFD与塔什库尔干站降水年内分布一致，但其在水文站卡群站和库鲁克栏杆站的年内降水波动较大，与观测月降水的双峰型特征有显著差异。ERA5和GPM在所有站点分别呈现单峰型和双峰型。多数降水产品高估了观测的月降水，尤其ERA5高估显著，如在卡群站，ERA5的6月平均降水为147.07 mm，约为观测降水(19.60 mm)的7.5倍。而GPM低估了卡群站和库鲁克栏杆站多数月份的降水。

为了直观的反映各降水产品的特征差异，统计2001—2010年四套降水产品相对于观测月降水的

表2 4种降水产品和观测月降水的误差指标

Tab. 2 Error indexes between precipitation products and observed monthly precipitation

站点	数据集	CC	BIAS/%	RMSE/mm
卡群站	ERA5	0.60	565.62	74.59
	GPM	0.55	-51.89	12.96
	CMFD	0.57	68.85	17.86
	AIMERG	0.75	22.54	11.57
库鲁克栏杆站	ERA5	0.83	593.57	88.39
	GPM	0.65	-16.84	9.90
	CMFD	0.51	36.09	14.06
	AIMERG	0.68	10.37	11.10
塔什库尔干站	ERA5	0.64	355.85	36.40
	GPM	0.45	65.75	14.98
	CMFD	0.96	22.67	3.88
	AIMERG	0.85	15.09	8.45

误差指标(表2),包括相关系数、均方根误差以及相对误差。可见ERA5、AIMERG产品与观测月降水有较高的相关系数(>0.6),而GPM与月降水的相关系数较低。ERA5显著高估了观测降水,相对误差介于355.85%~565.62%,均方根误差显著高于其他产品。AIMERG在多数站点的相对误差小于20%,且呈现较小的均方根误差;CMFD生成时融合了较多观测站点,所以在塔什库尔干站呈现了最高的相关系数和最低的均方根误差,但在其他站点,CMFD对月降水的捕捉能力不及AIMERG产品。总之,AIMERG产品对月降水的再现能力最强,ERA5产品最差。

由图5可见,多雨期时ERA5产品在所有站点命中率和误报率最高(>0.7),但关键成功指数最低,主要受较高的误报率影响所致。AIMERG在多数站点的多雨期命中率和误报率最低,而关键成功指数最高。与多雨期统计值相比,不同降水产品在少雨期的命中率和关键成功指数均减小,而多数降水数据在少雨期的误报率增加,GPM和ERA5的误报率甚至在部分站点达到0.9以上,而AIMERG的误报率最低。总之,不同降水产品均呈现出多雨期准确性高于少雨期的特征,AIMERG在不同时期均呈现了较高的日降水关键成功指数。

2.2.2 空间分布的精度评估 除了点尺度评估,本文还从空间分布的角度评估不同降水产品的精度。如图6所示,从全年尺度来看,ERA5月降水相关系数最高,在多数区域的相关系数均高于0.8,其

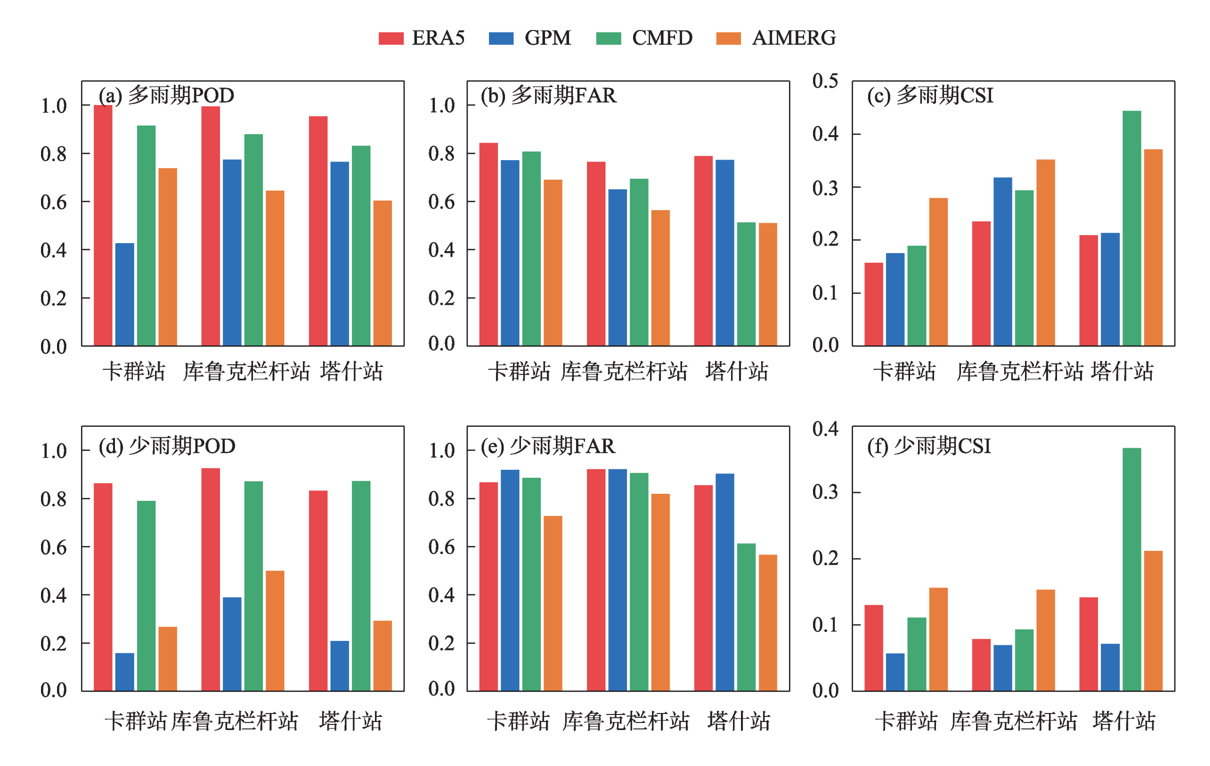


图5 不同站点日降水的命中率、误报率和关键成功指数的分布

Fig. 5 The simulated probability of detection, false alarm ratio and critical success index for four precipitation products at different stations

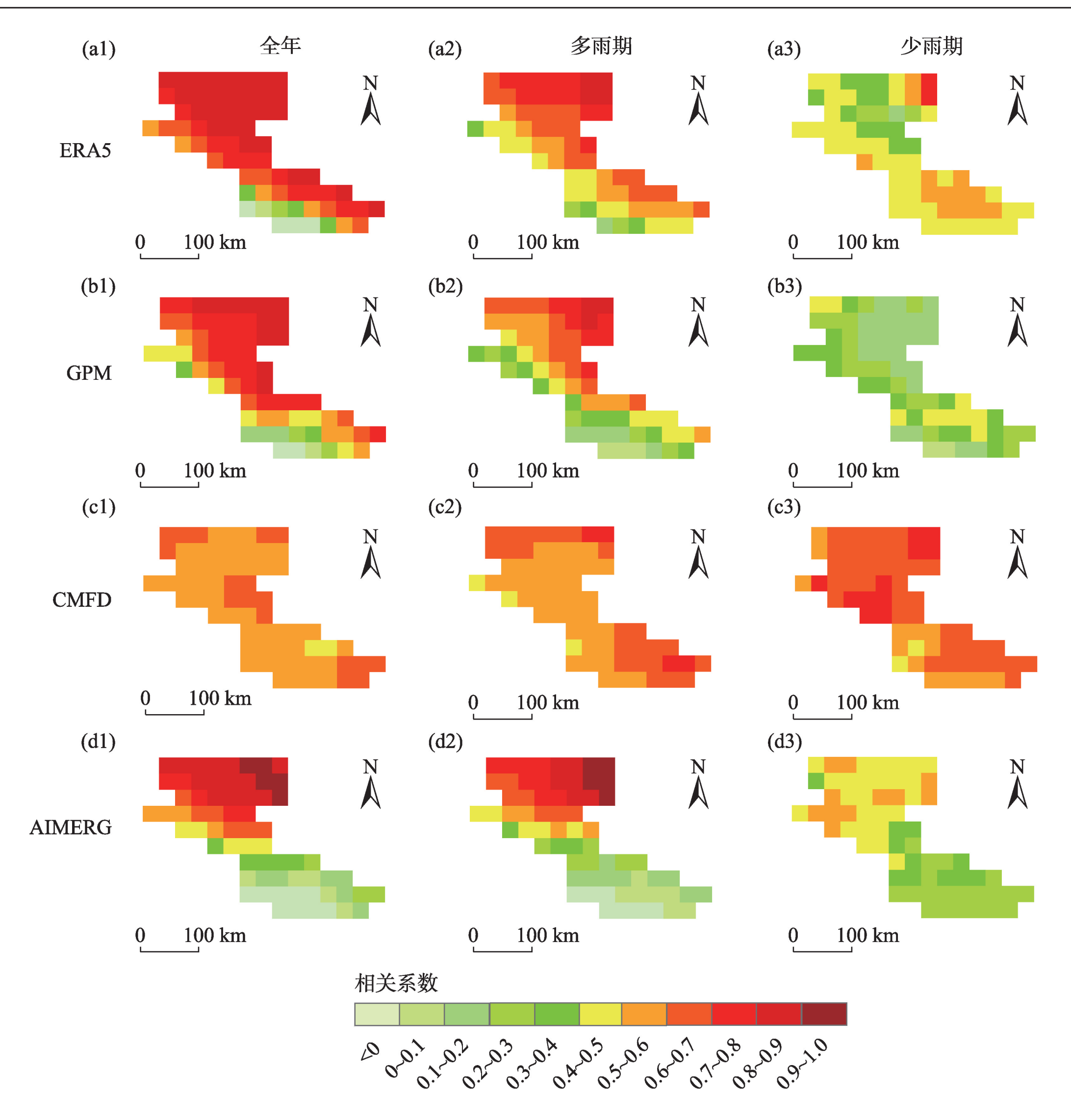


图6　不同降水产品的月降水相关系数空间分布

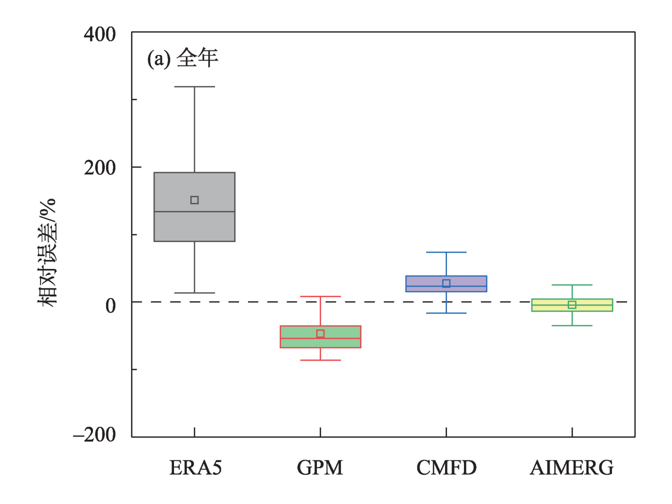
Fig. 6　Spatial distribution of correlation coefficients for monthly precipitation from different precipitation products

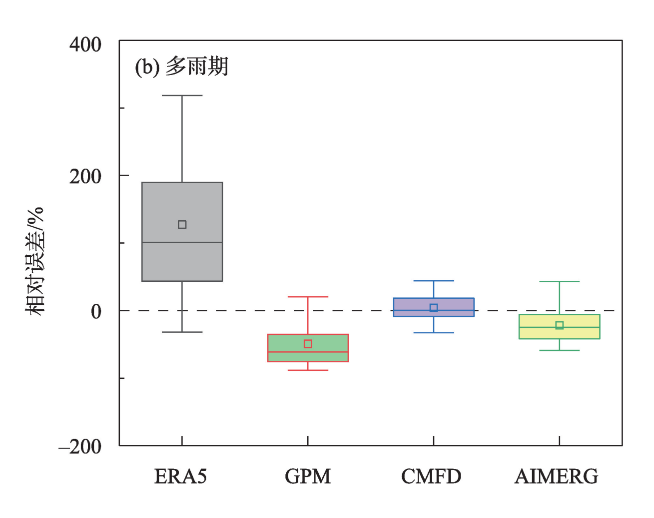
次为GPM和CMFD,仅少数区域的相关系数低于0.4。月降水的相关系数空间异质性最低的是CMFD,介于0.4~0.6。其他降水产品的相关系数空间异质性均较高,在北部地区相关系数高达0.8,但在高海拔的西南地区相关系数小于0。在流域北部地区多数降水产品的月降水相关系数呈现多雨期大于少雨期的情形,而在南部地区,ERA5和CMFD在两个时期的月相关系数均高于其他两种降水产品。

在全年尺度,ERA5降水显著偏高,相对误差均值高达151%,GPM降水整体偏低,均值约为−47%(图7)。与上述两种降水产品相比,CMFD和AIMERG呈现了较低的误差,误差均值分别为27%和−4%。与其他降水产品相比,ERA5降水的相对误差存在显著的空间异质性,25%和75%分位数相对误差分别达到90%和185%。多数降水产品多雨期误差特征与少雨期相似,如CMFD在不同时期均高估了研究区一半以上区域的降水量,但AIMERG低估了多数地区的多雨期降水,而在少雨期的误差特征以高估为主导。

2.3　不同降水产品的误差组分特征

图8展示了多源降水产品在不同季节的总误差和分误差的分布特征。总体上看,ERA5的总误差高于其他降水产品(图8a),ERA5的日平均最高误差达6.03 mm,而其他产品的最高误差为1.96 mm。4种降水产品的误差组分时间序列的变化特征存在明显的季节性差异,尤其在夏季和冬季的差异最显著。为了识别不同降水产品的主导误差,分别统计夏季和冬季出现频次最多的最大分误差项及相应





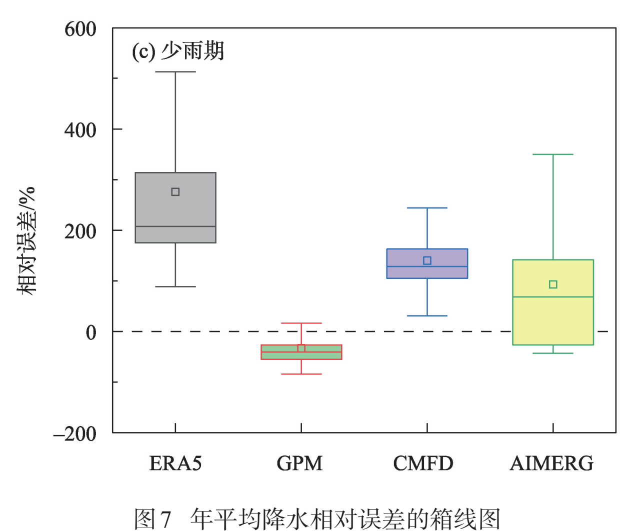


图7 年平均降水相对误差的箱线图

Fig. 7 The box plots of relative error in annual average precipitation

频次，结果如图8b~8e的右上角所示，不同产品夏季的主导误差为命中误差，发生频率介于0.51~0.62。各产品的冬季主导误差有较大差别。如全球再分析数据ERA5产品冬季主导误差为误报误差。原因可能是ERA5再分析数据在冬季包含很多小雨事件，导致对无降水事件捕捉能力差[9]。而区域性再分析产品CMFD数据在冬季的主导误差为命中误差；GPM和AIMERG数据在冬季均以漏报误差为主。

3 讨 论

本文从时间和空间尺度综合评估了四种降水产品（AIMERG、CMFD、ERA5和GPM）在叶尔羌河上游流域的适用性。表3列举了包含上述4种产品中的1种或者多种降水产品的高寒内陆河流域的适用性评估案例。有较多的研究关注了GPM与其他卫星遥感降水产品的适用性比较[8,26-30]，研究发现在天山山区GPM精度优于其他降水产品（如TRMM、CMORPH），但对高海拔区降水存在低估。而不同来源的降水产品在高寒内陆河源区精度的比较研究相对较少（仅在伊犁河上游和开都河上游）[10,31-32]，研究表明[31-32]，ERA5高估了开都河、伊犁河上游多数站点的降水量，在伊犁河上游ERA5的相关性、探测率均高于GPM，与Sun等[6]及本研究的结论一致。除了以往研究中关注的ERA5及GPM外，本研究还增加了AIMERG和CMFD数据进行适用性对比分析，结果表明CMFD的精度高于ERA5数据和GPM数据，原因为CMFD数据中融合了较多的地面观测数据。相似地，赵彤等[33]、班春广等[34]也发现CMFD对青藏高原降水特征的再现能力高于其他降水产品。AIMERG数据是GPM与亚洲地区高分辨率逐日网格化降水数据集APHRODITE的融合产品，已被证实在天山地区优于GPM的精度[10]，本文进一步聚焦于昆仑山的叶尔羌河上游，发现AIMERG不仅在雨季和非雨季日降水的捕捉能力比GPM有显著提高，且对站点月降水的年内变化特征的捕捉能力优于其他降水产品。可见AIMERG数据在高海拔寒区的日、月尺度降水特征方面表现出了较高的优势，有较大的应用潜力。

4 结 论

本文基于多个统计指标和误差分解模型，探究了AIMERG、CMFD、ERA5和GPM这4种降水产品在叶尔羌河上游流域的适用性和误差特征，得到主

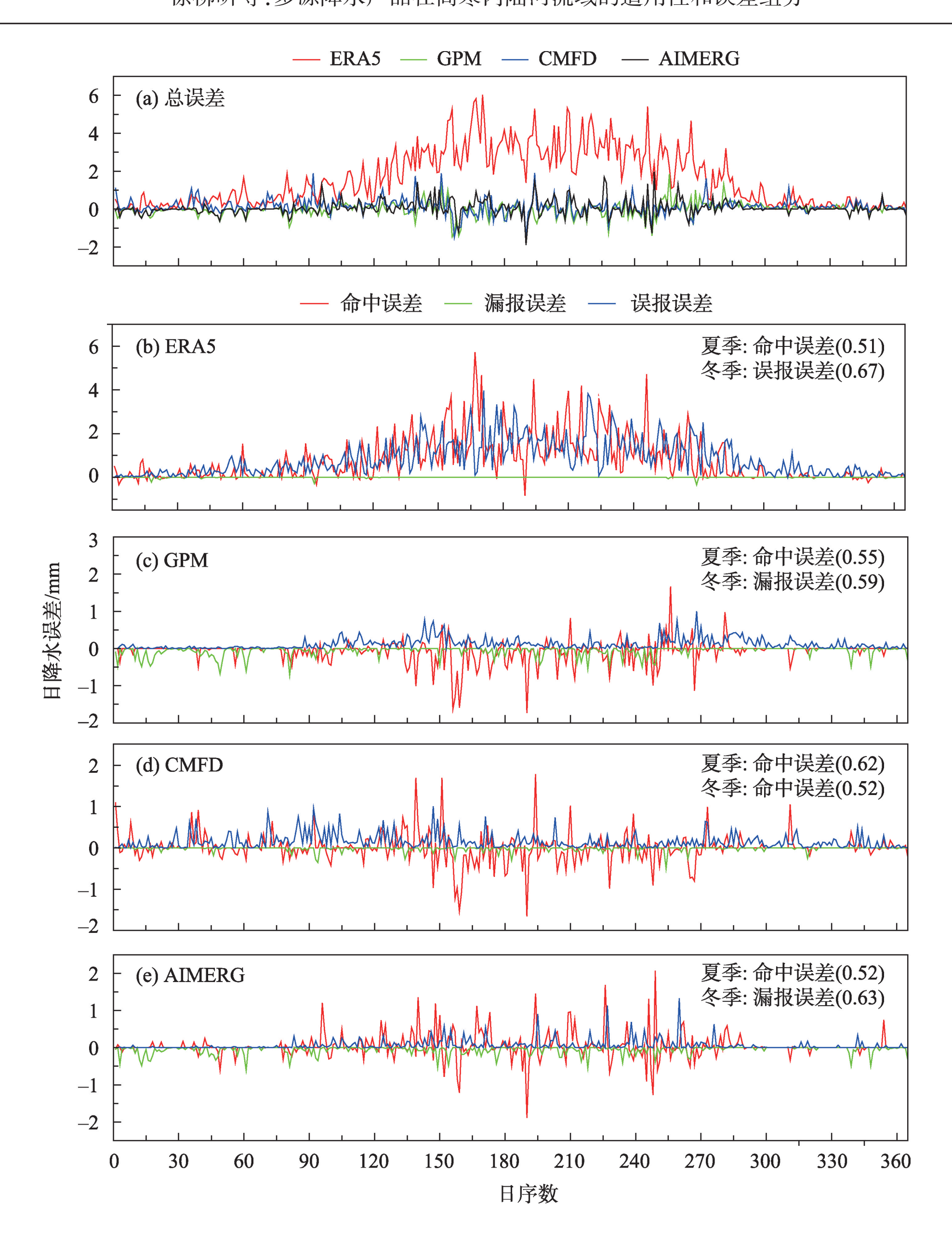


图8 多源降水产品在不同季节的总误差和分误差的分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of total and partial errors of multi-source precipitation products in different seasons

表3 不同降水产品在高寒内陆河流域适用性评估

Tab. 3 Typical cases of applicability evaluation of different precipitation products in the alpine and endorheic river watersheds

序号	涉及的降水产品	研究区	文献来源
1	TRMM3B42、GPM-IMERG、MSWEP V2.2	天山地区	[26]
2	GPM、IMERG-V06、TRMM	天山地区	[27]
3	GPM、TRMM、CMORPH	天山地区	[28]
4	GPM、TRMM、CMORPH	天山山区	[8]
5	GPM、TRMM	黑河流域	[29]
6	TRMM 3B42、CMORPH-RAW、CMORPH-CRT、APHRO、CN05.1、ITPCAS	黑河流域	[30]
7	IMERG、APHRODITE、CMPA	亚洲(含天山子区域)	[10]
8	GPM、ERA5、CHIRPS	伊犁河上游	[31]
9	TRMM、GPM、PERSIANN、CHIRPS、ERA5	开都河上游	[32]

要结论如下：

（1）CN05.1、CMFD和AIMERG的年降水呈现了南高北低的空间特征，而ERA5和GPM呈现了相反的空间分布。与其他产品相比，AIMERG和CMFD的降水空间异质性较高，均可以捕捉到西南部冰川区降水高的特征。

（2）从点尺度看，仅有AIMERG可以较好地再现所有站点年内降水的峰形和峰现时间，而且在雨季和非雨季均呈现较高的日降水成功指数。从空间尺度来看，ERA5月降水相关系数最高，在多数区域的相关系数均高于0.8。

（3）总体上看，ERA5的总误差高于其他降水产品。4种降水产品的误差组分时间序列的变化特征存在明显的季节性差异，尤其在夏季和冬季的差异最显著。不同降水产品夏季的主导误差为命中误差，各产品的冬季主导误差有较大差别。

参考文献（References）：

[1] Konapala G, Mishra A K, Wada Y, et al. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-10.

[2] 郭玉琳, 赵勇, 周雅蔓, 等. 新疆天山山区夏季降水日变化特征及其与海拔高度关系[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 57-65. [Guo Yulin, Zhao Yong, Zhou Yaman, et al. Diurnal variation of summer precipitation and its relationship with altitude in Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 57-65.]

[3] 申豪勇, 李佳, 王志恒, 等. 黄河支流汾河流域水资源开发利用现状及生态环境问题[J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1127-1138. [Shen Haoyong, Li Jia, Wang Zhiheng, et al. Water resources utilization and eco-environment problem of Fenhe River, branch of Yellow River[J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1127-1138.]

[4] 罗映雪, 徐长春, 楚智, 等. CN05. 1气象数据在流域水文模拟中的应用——以新疆开都河流域为例[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(3): 287-295. [Luo Yingxue, Xu Changchun, Chu Zhi, et al. Application of CN05. 1 meteorological data in watershed hydrological simulation: A case study in the upper reaches of Kaidu River Basin[J]. Climate Change Research, 2020, 16(3): 287-295.]

[5] 麦杞莹, 谭学志, 吴欣欣, 等. 多个高时空分辨率降水产品在珠江三角洲地区的多尺度精度评估[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2024, 63(3): 21-31. [Mai Qiying, Tan Xuezhi, Wu Xinxin, et al. Multi-scale accuracy assessment of multiple high spatial and temporal resolution precipitation products in the Pearl River Delta region[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2024, 63(3): 21-31.]

[6] Sun H, Su F, Yao T, et al. General overestimation of ERA5 precipitation in flow simulations for high mountain Asia basins[J]. Environmental Research Communications, 2021, 3(12): 1-9.

[7] 汪梓彤, 李石宝, 张志友, 等. GPM近实时降水产品在青藏高原的多尺度精度评价[J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 43-49. [Wang Zitong, Li Shibao, Zhang Zhiyou. Multi-scale accuracy evaluation of GPM precipitation products over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Yellow River, 2021, 43(4): 43-49.]

[8] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2074-2085. [Jin Xiaolong, Shao Hua, Zhang Chi, et al. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2074-2085.]

[9] Tang G Q, Clark M P, Papalexiou S M, et al. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240(12): 111697.

[10] Ma Z Q, Xu J T, Zhu S Y, et al. AIMERG: A new Asian precipitation dataset(0.1°/half-hourly, 2000-2015) by calibrating GPM IMERG at daily scale using Aphrodite[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(3): 1525-1544.

[11] 陈家琳, 雍斌. GPM-GSMaP卫星降水在中国大陆的误差解析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2020, 15(4): 76-85. [Chen Jialin, Yong Bin. Error analysis of global satellite mapping of precipitation for GPM-GSMaP in Mainland China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2020, 15(4): 76-85.]

[12] 张茹, 雍斌, 曾岁康, 等. GPM卫星降水产品在中国大陆的精度评估[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 50-59. [Zhang Ru, Yong Bin, Zeng Suikang. Evaluation of GPM satellite precipitation products over Mainland China[J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 50-59.]

[13] 陈昱凝, 胡林金, 颜伟, 等. 叶尔羌河上游不同流域夏季气候和径流变化研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 678-684. [Chen Yuning, Hu Linjin, Yan Wei, et al. Study of the changes in summer climate and runoff in two upper streams of the Yarkant River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 678-684.]

[14] 阚宝云, 苏凤阁, 童凯, 等. 四套降水资料在喀喇昆仑山叶尔羌河上游流域的适用性分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 710-722. [Kan Baoyun, Su Fengge, Tong Kai, et al. Analysis of the applicability of four precipitation datasets in the upper reaches of the Yarkant River, the Karakorum[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 710-722.]

[15] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111. [Wu Jia, Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.]

[16] Liu Z, Di Z, Qin P, et al. Evaluation of six satellite precipitation products over the Chinese mainland[J]. Remote Sensing, 2022, 14(24): 6277.

[17] 胡一阳, 徐影, 李金建, 等. CMIP6不同分辨率全球气候模式对中国降水模拟能力评估[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 730-743. [Hu Yiyang, Xu Ying, Li Jinjian, et al. Evaluation on the performance of CMIP6 global climate models with different horizontal resolution in simulating the precipitation over China[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 730-743.]

[18] Kan B, Su F, Xu B, et al. Generation of high mountain precipitation and temperature data for a quantitative assessment of flow regime in the upper Yarkant Basin in the Karakoram[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(16): 8462-8486.

[19] 杜懿, 林泽群, 庄胜杰, 等. GPM卫星降水产品在长江流域的空间降尺度研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(3): 697-707. [Du Yi, Lin Zequn, Zhuang Shengjie, et al. Spatial downscaling of GPM satellite precipitation products in the Yangtze River Basin, China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(3): 697-707.]

[20] 林书睿, 顾恒竹, 路明月, 等. 基于GWR模型的典型区域GPM数据降尺度研究——以浙江省为例[J]. 气象科学, 2022, 42(6): 793-803. [Lin Shurui, Gu Hengzhu, Lu Mingyue. Downscaling research of GPM data in typical region based on GWR model: A case study of Zhejiang Province[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2022, 42(6): 793-803.]

[21] 刘婷婷, 朱秀芳, 郭锐, 等. ERA5再分析降水数据在中国的适用性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 66-79. [Liu Tingting, Zhu Xiufang, Guo Rui, et al. Applicability of ERA5 reanalysis of precipitation data in China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 66-79.]

[22] 刘鸿波, 董理, 严若婧, 等. ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(3): 299-311. [Liu Hongbo, Dong Li, Yan Ruojing, et al. Evaluation of Near-surface wind speed climatology and long-term trend over China's Mainland Region based on ERA5 reanalysis[J]. Climate and Environmental Research, 2021, 26(3): 299-311.]

[23] 夏怡洁. 基于CMFD数据的新疆天山降水同位素云下二次蒸发研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023. [Xia Yijie. Below-cloud Secondary Evaporation of Precipitation Isotopes across the Tianshan Mountains in Xinjiang Based on the CMFD Data[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023.]

[24] 崔豪, 王贺佳, 肖伟华, 等. 三峡库区CMFD降水数据适用性评估[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 98-104. [Cui Hao, Wang Hejia, Xiao Weihua, et al. Evaluation on application accuracy of CMFD precipitation data in Three Gorges Reservoir Area[J]. Yangtze River, 2021, 52(8): 98-104.]

[25] Tian Y, Peters-Lidard C D, Eylander J B, et al. Component analysis of errors in satellite-based precipitation estimates[J]. Journal of Geophysical Reserch-atmospheres, 2009, 114(D24): 1-15.

[26] Li X, He X, Li X, et al. Spatiotemporal evaluation and estimation of precipitation of multi-source precipitation products in Arid Areas of Northwest China—A Case Study of Tianshan Mountains[J]. Water, 2022, 14(16): 2566.

[27] Anjum N M, Ahmad I, Ding Y, et al. Assessment of IMERG-V06 precipitation product over different hydro-climatic regimes in the Tianshan Mountains, North-Western China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(19): 2314-2314.

[28] Chi Z, Xi C, Hua S, et al. Evaluation and intercomparison of high-resolution satellite precipitation estimates—GPM, TRMM, and CMORPH in the Tianshan Mountain area[J]. Remote Sensing, 2018, 10: 1543.

[29] 王思梦, 王大钊, 黄昌. GPM卫星降水数据在黑河流域的适用性评价[J]. 自然资源学报, 2018, 33(10): 1847-1860. [Wang Simeng, Wang Dazhao, Huang Chang. Evaluating the applicability of GPM satellite precipitation data in Heihe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(10): 1847-1860.]

[30] Yang Y, Tang J, Xiong Z, et al. Evaluation of high-resolution gridded precipitation data in arid and semiarid regions: Heihe River Basin, Northwest China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(12): 3075 - 3101.

[31] 尹瑞琪, 李琼芳, 陈启慧, 等. 伊犁河上游流域三种日尺度降水产品性能评估[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 540-549. [Yin Ruiqi, Li Qiongfang, Chen Qihui, et al. Performance evaluation of three daily precipitation products in the upper reaches of the Ili River[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 540-549.]

[32] 陈世雪. 多源降水数据的开都河上游水文模拟效用评估[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2022. [Chen Shixue. Assessment of the Utility of Hydrological Simulation of Theupper Kaidu River with Multi-source Precipitation Date[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2022.]

[33] 赵彤, 赵梦凡, 周秉荣, 等. 三种再分析气温降水资料在青藏高原的适用性评价[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(3): 116-125. [Zhao Tong, Zhao Mengfan, Zhou Bingrong, et al. Applicability evaluation for three reanalysis datasets of temperature and precipitation over the Tibetan Plateau[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2023, 17(3): 116-125.]

[34] 班春广, 左德鹏, 徐宗学, 等. 高寒区多源降水产品精度与水文模拟效果评估——以雅鲁藏布江流域和拉萨河流域为例[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 159-168. [Ban Chunguang, Zuo Depeng, Xu Zongxue, et al. Assessment on the accuracy and hydrological simulation effect of multi-source precipitation products in the high cold alpine region——Case study in the Yarlung Zangbo River Basin and the Lhasa River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 159-168.]

Evaluation and Error decomposition of multisource precipitation data in an alpine and endorheic river watershed

XU Liuxin[1,2], WANG Wenyu[1,2], WANG Xiaoyan[1,2], WANG Xueying[1,2], GU Huanghe[1,2]
(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: The quality of precipitation data are critical factor influencing the accuracy of runoff simulation in high-cold mountainous districts as it plays an important role in the ecological environmental protection and water resource management. The spatiotemporal characteristics of precipitation are analyzed in the headwater catchment of the Yarkant River Basin on the basis of GPM (Global Precipitation Measurement), AIMERG (the Asian precipitation dataset by calibrating the GPM-era IMERG), CMFD (China Meteorological Forcing Dataset) and ERA5 (The fifth-generation atmospheric reanalysis of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts). Subsequently, the accuracy of the multisource precipitation data are evaluated against the observed precipitation. The error characteristics of various precipitation products was analyzed by means of the error decomposition model. The main findings were as follows: (1) The spatial pattern for CMFD and AIMERG was characterized by the increase from the north to south, which was consistent with the spatial pattern for the grid observation data set CN05.1 (the National Climate Center of China Meteorological Administration precipitation dataset). An opposite pattern was detected for ERA5 and GPM. Additionally, AIMERG and CMFD displayed higher precipitation in the glacier area. (2)The inter-annual variation characteristics of various precipitation products were significantly different, and the ratio of summer and autumn precipitation to annual precipitation for most precipitation products was more than 60%. Among all the precipitation products, only AIMERG reproduced the seasonal patterns, such as the time when the maximum monthly precipitation occurred and the peak shape for the monthly precipitation at all stations. AIMERG had the greatest ability to reproduce gauged monthly precipitation, with a higher correlation coefficient (>0.6) and lower root mean square error (8.45−11.57 mm), whereas ERA5 show the poorest ability. (3) All precipitation products showed a higher performance in reproducing daily precipitation during the wet period (from May to October) than during the dry period (from November to April). AIMERG had a greater critical success index in both wet period and dry period than for other precipitation products. (4) The dominant error of the various precipitation products in summer was the hit error, whereas the dominant error in winter varied with the precipitation product. These findings provide some reference for the runoff simulation and algorithm improvement of precipitation products in the high-cold region, where meteorological data are limited.

Keywords: reanalysis data; satellite precipitation; AIMERG; error decomposition model; upper Yarkant River